

歴史都市防災論文集 Vol. 3 (2009年6月)

歴史的木造寺院で用いられた古材の 圧縮特性に関する実験的研究

Compression stiffness of aged members used at Japanese historical wooden temple

大岡 優¹・棚橋 秀光²・伊津野 和行³・土岐 憲三⁴

Yu Ooka, Hideaki Tanahashi, Kazuyuki Izuno and Kenzo Toki

¹立命館大学大学院 理工学研究科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Graduate student, Science and Engineering, Ritsumeikan University

²立命館大学特別招聘教授 R-GIRO (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Professor, Global Innovation Research Organization, Ritsumeikan University

³立命館大学教授 理工学部都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Professor, Dept. of Civil Engineering, Ritsumeikan University

⁴立命館大学教授 R-GIRO (〒603-8341 京都市北区小松原北町58)

Professor, Global Innovation Research Organization, Ritsumeikan University

Compressive phenomena affects on the earthquake resistant capacity of Japanese traditional wooden structures. However, relations between aged wooden members and compression performances are not clarified yet. This study conducted the compression tests of aged wooden members of Japanese historical temple. The mean value of Young's modulus of Japanese cypress specimen, which had been used as a structural member for 375 years, was larger than the values of the past studies. On the contrary, zelkova specimen, which had been used as a structural member for 16 years, showed a little smaller value than the handbook for new wood. However, Young's moduli differed considerably by the direction of annual rings or measured position in the specimens. The relation between the density and Young's modulus perpendicular to grain showed high correlation.

Key Words : *historical wooden temple, compressive characteristics of aged members, zelkova, Japanese cypress*

1. はじめに

社寺仏閣を代表とする伝統的木造建築物は、我が国が世界に誇れる文化遺産であり、国民全員の貴重な財産である。その存在は我々の日常生活に安らぎと、精神的豊かさをもたらせてくれている。したがって、これらの建築物を地震等の自然災害から保護し、後世に継承していくことが重要である。

社寺仏閣等の伝統的木造建築物の耐震性能の評価において、仕口のめり込み抵抗が重要な耐震要素となっている。そのめり込み性能を決定する材料特性として、最も基本的な弾性定数である縦圧縮ヤング係数と、めり込みに直接関わる横圧縮ヤング係数がある。現存する社寺仏閣は、建立されてから数百年が経過しているものも多く、そのヤング係数は耐震性能評価上、重要であるが、その経年変化と樹種による差異はほとんど明らかになっていない。さらに、横圧縮ヤング係数は、一般に年輪方向によって大きく異なる。また、実際のめり込み挙動においては、圧縮試験時のクロスヘッド間より求めたヤング係数が相当するが、その値は歪ゲージより求めたヤング係数と大きく異なる¹⁾。

そこで本研究では、京都清水寺で使用されていたケヤキ古材とヒノキ古材を用いた縦圧縮試験・横圧縮試

験（JISZ2101）を行い、古材の圧縮特性の測定方法による差異、年輪方向の違いによる検討を行ったので報告する。

2. 古材の強度試験

(1) 概要

古材の強度特性の把握、めり込み性能評価を目的とし、縦圧縮試験・横圧縮試験を行った。強度試験に用いた古材は、清水寺で使用されていた、ケヤキおよびヒノキの古材である。ケヤキ古材は 2004 年 9 月に行われた清水寺本堂の舞台張替え工事の際に採取したものである。ヒノキ古材は 2005 年に清水寺奥の院(1633 年建造)で舞台修理工事を実施された際に採取した、舞台柱の一部である。なお、本試験に用いた古材の周辺に存在していた材を放射性炭素年代測定したところ、ケヤキの樹齢が約 220 年、ヒノキの樹齢が約 720 年であった²⁾。古材の状態を写真 1、2 に、古材の概要を表 1 に示す。なお、表 1 の構造材年数とは、清水寺で構造材として使用された年数である。



写真1 ケヤキ古材



写真2 ヒノキ古材

表1 古材の概要

樹種	種別	構造材年数	採取場所	古材の状態
ケヤキ	広葉樹	16 年	本堂舞台下	表面に腐朽による劣化あり
ヒノキ	針葉樹	375 年	奥の院	シロアリによる内部欠損あり

(2) 縦圧縮試験

a) 試験方法

縦圧縮試験はJISZ2101の「縦圧縮試験」に準拠し試験を行った。縦圧縮試験体は写真1、2に示す古材の腐朽・蟻害による損傷がない箇所から、縦圧縮試験用に30mm×30mm×60mmの試験体を作成した。試験体数は、ケヤキ縦圧縮試験用12体、ヒノキ縦圧縮試験用12体の計24体である。試験体は、長手方向を繊維方向に平行にし、その両断面を長手方向に垂直かつ平行にするようにした。また、ケヤキ古材の試験体をK-V-1～K-V-12、ヒノキ古材の試験体をH-V-1～H-V-12と区分した。縦圧縮ヤング係数は、図2に示す中間部計測装置を用い、通常の歪ゲージ（正面背面の2面）計測の他に、クロスヘッド間変位計測と中間部変位計測（中間部30mm間を左右2個の小型変位計により計測する装置を使用）により算出した。

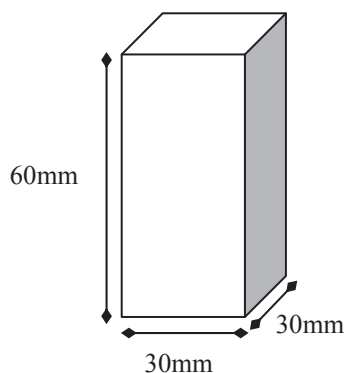


図1 試験体寸法



写真3 試験体

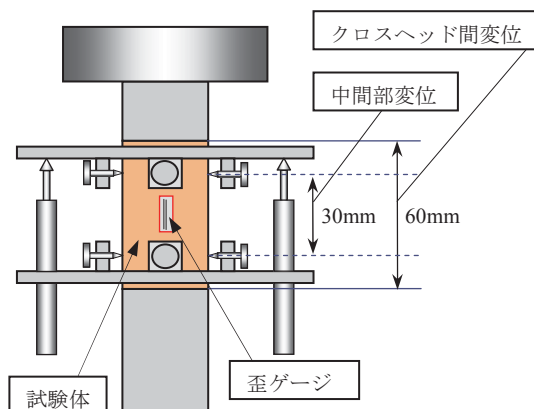


図2 測定方法

b) 試験結果

縦圧縮試験より得られたケヤキ古材とヒノキ古材の各試験体の質量、密度、含水率、各計測位置における縦圧縮ヤング係数、縦圧縮強さを表2に示す。なお、縦圧縮ヤング係数における E_G は歪ゲージ、 E_C は中間部歪、 E_{CH} はクロスヘッド間歪によるヤング係数である。

表2 縦圧縮試験結果

	質量 (g)	密度 (g/cm ³)	含水 率(%)	縦圧縮ヤング係数 (GPa)			縦圧縮強 さ(MPa)		質量 (g)	密度 (g/cm ³)	含水 率(%)	縦圧縮ヤング係数 (GPa)			縦圧縮強 さ(MPa)	
				E _G	E _C	E _{CH}						E _G	E _C	E _{CH}		
K-V-1	41	0.757	9.31	10.84	10.73	6.76	60.9		K-V-2	34	0.637	10.10	9.14	9.22	6.32	54.3
K-V-3	38	0.714	9.20	12.42	12.83	7.81	62.7		K-V-4	36	0.681	9.17	13.77	13.44	6.79	57.8
K-V-5	36	0.676	10.74	11.51	12.83	7.23	58.9		K-V-6	33	0.617	10.40	8.86	8.66	6.30	51.9
K-V-7	37	0.692	10.24	10.87	9.50	7.31	57.4		K-V-8	33	0.621	10.70	9.28	9.22	6.65	51.4
K-V-9	36	0.676	10.03	11.41	11.21	8.10	60.2		K-V-10	34	0.638	10.71	9.26	9.56	6.60	53.0
K-V-11	36	0.678	10.19	11.61	11.94	5.49	53.1		K-V-12	38	0.718	9.94	7.32	✕	5.01	43.1
ケヤキ平均	36	0.675	10.06	10.52	10.83	6.70	55.4									
変動係数				0.163	0.151	0.126	0.093									
H-V-1	23	0.425	10.43	10.73	9.73	5.86	46.0		H-V-2	23	0.423	9.48	11.03	10.45	6.23	47.4
H-V-3	22	0.405	9.31	8.19	✕	4.57	44.0		H-V-4	22	0.404	9.80	8.30	7.62	4.98	45.6
H-V-5	24	0.460	8.22	11.38	11.26	6.68	51.8		H-V-6	24	0.442	9.09	11.51	11.72	6.22	51.7
H-V-7	24	0.442	9.09	9.83	9.70	4.43	50.9		H-V-8	23	0.428	9.39	9.15	9.74	4.80	48.6
H-V-9	25	0.481	10.22	10.63	9.83	5.56	53.9		H-V-10	23	0.425	9.00	10.23	10.52	6.22	49.1
H-V-11	23	0.430	8.84	11.02	10.67	5.50	49.9		H-V-12	22	0.402	9.22	7.50	8.46	4.35	45.2
ヒノキ平均	23.17	0.430	9.34	9.96	9.97	5.45	48.7									
変動係数				0.131	0.112	0.141	0.061									

表3 縦圧縮ヤング係数比較

樹種	本試験	2008 年度試験値 ²⁾	単位(GPa)	
			棚橋試験値 ³⁾	木材工業ハンドブック ⁴⁾
ケヤキ	10.5	14.6		10.3
ヒノキ	9.96	13.4	9.15	

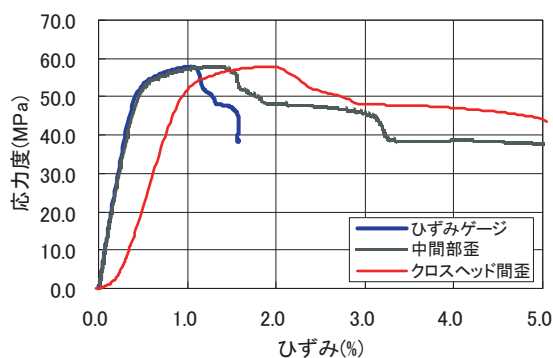


図3 応力度-歪曲線（ケヤキ縦圧縮）

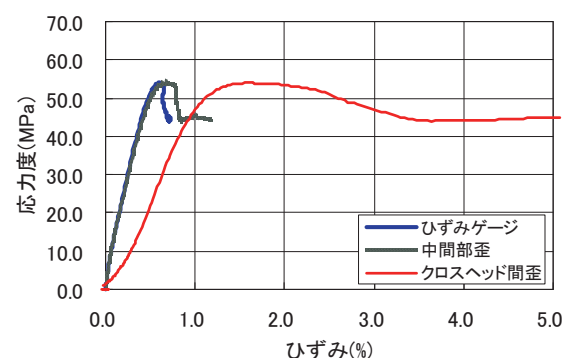


図4 応力度-歪曲線（ヒノキ縦圧縮）

ケヤキ古材の縦圧縮ヤング係数をみると、歪ゲージ計測におけるヤング係数の平均値は 10.5GPa（変動係数 C_v :0.16）となった。ヒノキ古材の歪ゲージ計測におけるヤング係数の平均値は 9.96GPa（ C_v :0.13）となった。

本試験における歪ゲージ計測のヤング係数を既往の研究^{2),3)}と木材工業ハンドブック⁴⁾の値と比較した。2008 年度試験²⁾は、本試験で使用した古材とほぼ同様のもの（樹種・構造材年数・構造材として使用されていた場所）を用い、歪ゲージ計測のみで試験を行ったものである。また、棚橋試験³⁾は新材のヒノキを対象に縦圧縮試験と年輪方向別の横圧縮試験を行ったものであり、ケヤキやヒノキにおける古材や年輪方向別の強度試験データが非常に少ないため、今回はこれらの値と比較することとした。縦圧縮ヤング係数の比較表を表 3 に示す。表 3 より、ケヤキ古材の歪ゲージ計測における縦圧縮ヤング係数はハンドブックの値

10.3GPa とほぼ同じ値であった。2008 年度試験値²⁾と比較すると、30%程度小さい値であった。構造材年数は同じであるにもかかわらず、2008 年度試験値と 30%異なる結果となったのは、異なる部位から試験体を作成したためによる木材間のばらつきが原因だと考えられる。

ヒノキ古材においては、2008 年度試験値と比較すると、26%程度小さな値となったが、棚橋が行った試験結果³⁾と比較すると 9%程度大きな値であった。木材は、材料ごとで強度特性のばらつきが大きい、本試験の値と他の文献との比較をみると、特にヒノキの縦圧縮ヤング係数においては、構造材となってから 375 年経過しているにもかかわらず、大きな剛性低下は見られなかった。

図 3、4 の応力度-歪曲線をみると、歪ゲージと中間部歪においては、载荷による試験体の形状変化によって計測が途切れるものがあった。クロスヘッド間歪に着目すると、ケヤキ古材・ヒノキ古材ともに降伏してからも 5%以上変形する試験体が多かった。これは、载荷後、早い段階で試験体端部の歪が増大し、その部分で木材細胞が凝縮することによる歪硬化を起こしたためだと考えられる。

次に、歪計測位置の違いによる縦圧縮ヤング係数を図 5 に示す。ケヤキ古材、ヒノキ古材ともに歪ゲージ計測のヤング係数と中間部歪のヤング係数はほぼ同じ値となったが、クロスヘッド間歪によるヤング係数はそれらと比べ、40%程度小さい値となった。

密度と歪ゲージ計測における縦圧縮ヤング係数との相関関係を調べてみると、図 6 が示すように、ヒノキで高い相関関係がみられた。ケヤキにおいても外れ値と思われる最大値・最小値を除いた場合で高い相関関係がみられる結果となった。（図中の r は相関係数で、0.6 以上であれば相関が高いといえる）。また、ヒノキにおいては、 E_G 、 E_C 、 E_{CH} の順で密度との相関関係が低くなった。

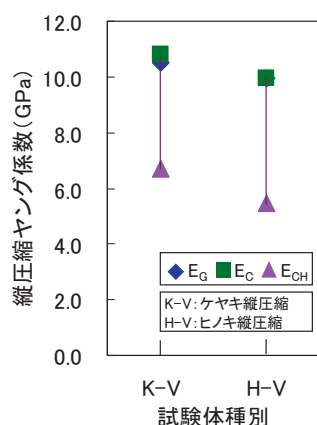


図 5 縦圧縮ヤング係数

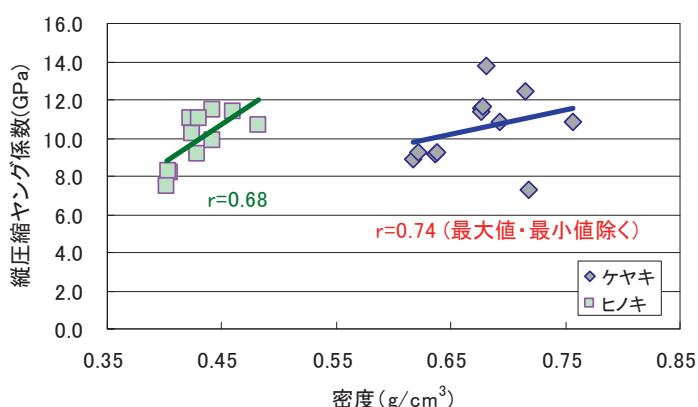


図 6 密度と縦圧縮ヤング係数の相関関係



図 7 年輪方向

(3) 横圧縮試験

a) 試験方法

横圧縮試験はJISZ2101の「横圧縮試験」に準拠し試験を行った。横圧縮試験体は写真1、2に示す古材の腐朽・蟻害による損傷がない箇所から、横圧縮試験用に30mm×30mm×60mmの試験体を作成した。試験体数は、ケヤキ横圧縮試験用（LTR方向）12体、ヒノキ横圧縮試験用（LR・LT・LTR）各12体の計48体である。なお、横圧縮試験における記号は、载荷方向が図7に示すとおりLRが半径方向、LTが接線方向、LTRが追柵

の年輪方向である。試験体は、長手方向を繊維方向に垂直にし、その両断面を長手方向に垂直かつ平行にするようにした。また、ケヤキ古材の試験体をK-LTR-1～K-LTR-12、ヒノキ古材の試験体をH-LR-1～H-LR-12、H-LT-1～H-LT-12、H-LTR-1～H-LTR-12と区分した。横圧縮ヤング係数も縦圧縮ヤング係数と同様に、図2に示す中間部計測装置を用い、通常の歪ゲージ計測の他に、クロスヘッド間変位計測と中間部変位計測によりヤング係数を算出した。

b) 試験結果

横圧縮試験より得られた各試験体の質量、密度、含水率、各計測位置における横圧縮ヤング係数を表4に示す。

表4 横圧縮試験結果

	質量 (g)	密度 (g/cm ³)	含水 率(%)	横圧縮ヤング係数 (MPa)				質量 (g)	密度 (g/cm ³)	含水 率(%)	横圧縮ヤング係数 (MPa)		
				E _G	E _C	E _{CH}					E _G	E _C	E _{CH}
K-LTR-1	34	0.639	9.21	1109	952	779	K-LTR-2	38	0.714	9.48	1516	1353	1053
K-LTR-3	32	0.600	7.97	1042	1007	726	K-LTR-4	35	0.656	8.75	1107	1027	847
K-LTR-5	32	0.603	8.42	1050	1005	863	K-LTR-6	35	0.660	8.44	1241	1157	907
K-LTR-7	33	0.621	9.93	1062	1033	749	K-LTR-8	34	0.640	9.29	1071	1100	827
K-LTR-9	33	0.618	9.27	972	974	795	K-LTR-10	33	0.616	8.79	1059	1019	754
K-LTR-11	33	0.616	8.97	1012	1036	732	K-LTR-12	35	0.657	9.84	1091	1159	734
ケヤキLTR平均	33.92	0.637	9.03	1111	1068	814							
変動係数				0.123	0.099	0.112							
H-LR-1	24	0.435	10.55	1456	1536	774	H-LR-2	25	0.452	9.01	1072	940	613
H-LR-3	24	0.439	10.60	1482	1364	955	H-LR-4	25	0.455	10.09	1090	936	683
H-LR-5	25	0.457	10.22	1002	958	670	H-LR-6	25	0.455	9.57	1309	1004	673
H-LR-7	25	0.457	9.61	1319	1164	788	H-LR-8	23	0.420	7.83	1669	1257	715
H-LR-9	25	0.455	10.04	1257	1043	680	H-LR-10	24	0.439	10.14	1530	1394	911
H-LR-11	24	0.437	9.26	1547	1139	818	H-LR-12	24	0.436	9.72	1535	1186	793
ヒノキLR平均	24.42	0.445	9.72	1356	1160	756							
変動係数				0.153	0.162	0.131							
H-LT-1	22	0.406	9.05	831	703	500	H-LT-2	23	0.421	8.88	888	794	461
H-LT-3	25	0.461	8.73	1018	856	553	H-LT-4	25	0.462	10.57	936	731	600
H-LT-5	23	0.420	10.28	913	719	574	H-LT-6	24	0.447	8.60	801	606	327
H-LT-7	23	0.418	8.61	810	635	407	H-LT-8	25	0.461	10.43	958	757	545
H-LT-9	24	0.444	8.52	889	744	476	H-LT-10	23	0.422	9.95	913	736	545
H-LT-11	23	0.422	9.95	898	698	527	H-LT-12	23	0.420	10.58	848	681	493
ヒノキLT平均	23.58	0.434	9.51	892	722	501							
変動係数				0.068	0.088	0.146							
H-LTR-1	26	0.478	10.46	315	259	262	H-LTR-2	26	0.476	9.05	276	244	235
H-LTR-3	26	0.477	9.17	299	282	246	H-LTR-4	25	0.463	7.63	327	311	259
H-LTR-5	25	0.452	8.86	284	154	209	H-LTR-6	26	0.480	10.08	286	217	200
H-LTR-7	24	0.440	10.71	361	284	270	H-LTR-8	26	0.482	10.50	367	324	255
H-LTR-9	26	0.486	10.50	246	242	230	H-LTR-10	26	0.481	8.71	327	292	260
H-LTR-11	26	0.488	11.81	292	269	247	H-LTR-12	26	0.480	10.04	306	273	243
ヒノキLTR平均	25.67	0.474	9.80	307	263	243							
変動係数				0.108	0.166	0.085							

表5 横圧縮ヤング係数比較

樹種	本試験	棚橋試験値 ³⁾	単位(GPa)
			木材工業ハンドブック ⁴⁾
ケヤキ(LTR)	1.11		1.18
ヒノキ(LR)	1.36	0.91	
ヒノキ(LT)	0.892	0.53	
ヒノキ(LTR)	0.307		

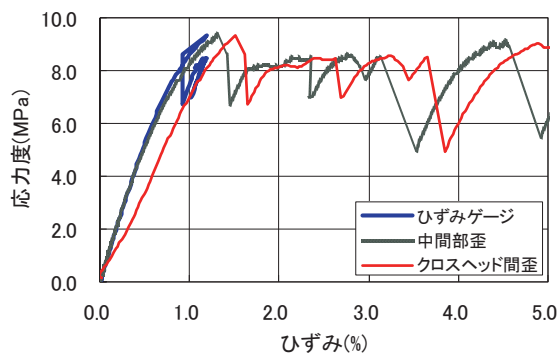


図8 応力度-歪曲線（ケヤキ横圧縮LTR）

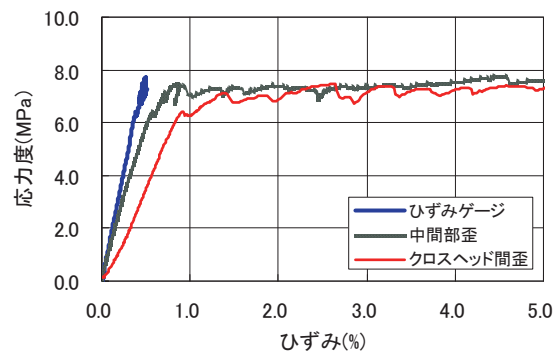


図9 応力度-歪曲線（ヒノキ横圧縮LR）

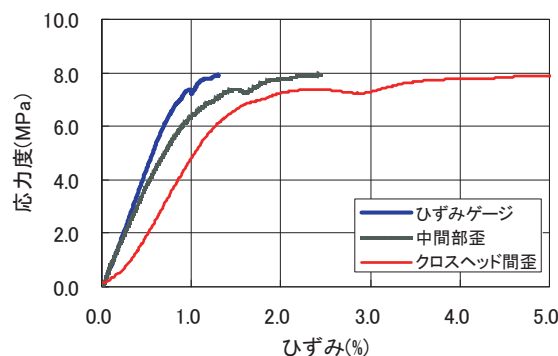


図10 応力度-歪曲線（ヒノキ横圧縮LT）

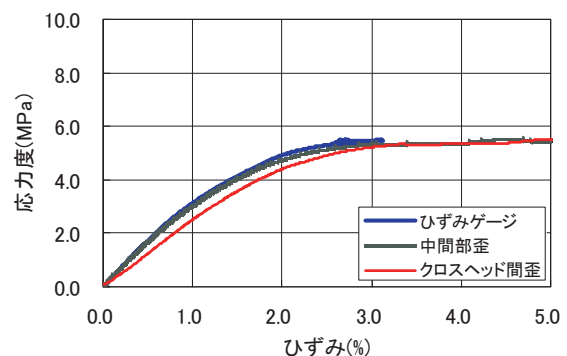


図11 応力度-歪曲線（ヒノキ横圧縮LTR）

ケヤキの横圧縮ヤング係数（LTR）においては、平均値 1.11GPa（Cv:0.12）となった。ヒノキ古材の横圧縮ヤング係数においては、既往の文献¹⁾と同じように年輪方向による違いが大きかった。歪ゲージ計測における横圧縮ヤング係数の平均値は、LR で 1.36GPa（Cv:0.15）、LT で 0.89GPa（Cv:0.068）、LTR で 0.307GPa（Cv:0.108）と LTR 方向が最も小さい値となった。

ケヤキ古材とヒノキ古材の歪ゲージ計測による横圧縮ヤング係数の平均値を既往の研究³⁾とハンドブック⁴⁾の値と比較した。横圧縮ヤング係数の比較表を表 5 に示す。ケヤキの LTR 方向の横圧縮ヤング係数の平均値は、ハンドブックの値より 6%小さい値となった。

ヒノキの横圧縮ヤング係数では LR で 1.36GPa（Cv:0.15）、LT で 0.89GPa（Cv:0.068）と既往の研究と比較してそれぞれ 50%、67%大きな値であった。

横圧縮試験における応力度-歪曲線をみると、ケヤキの横圧縮試験（LTR のみ）では、図 8 に示すように降伏してから割裂やクラックにより応力度が増減を繰り返す特徴がある。ヒノキ古材の横圧縮試験では、年輪方向の違いによって、応力度-歪曲線に変化が見られた。図 9 に示す LR の場合は降伏してから細かい増減を繰り返し、図 10 に示す LT の場合は降伏後も強度が若干上昇する、図 11 の LTR においては、降伏してから応力度がほぼ横ばいになるなどの特徴が見られた。図 8 と図 11 において、年輪方向が同じ LTR であるにもかかわらず、応力度-歪曲線に違いがみられる原因としては、樹種による細胞組織構造の違い、樹齢による違いが考えられる。今後、様々な樹種や樹齢を対象とした横圧縮試験を行い、詳細に検討する必要がある。歪計測位置によるヤング係数の違いをみると、図 12 が示すように、ヒノキ古材の LTR における横圧縮ヤング係数以外では大きな差がみられる結果になった。

密度と歪ゲージ計測による横圧縮ヤング係数との相関関係をみると、図 13 より、ケヤキにおいては、 $r=0.89$ と高い相関関係であった。ヒノキに関しては、LR、LT 方向で高い相関が得られた。また、ケヤキ、ヒノキともに、 E_G 、 E_C 、 E_{CH} の順で密度との相関関係が低くなった。ヒノキ（LR）においては、他の年輪方向とは異なり高い負の相関関係となっている。この結果の原因については不明瞭ではあるが、これは、木材の年輪が早材と晩材という硬さ・密度の異なる層が積み重なって構成され、LR の試験が他の LT、LTR とは

異なり、その年輪に対して垂直に荷重を掛けることが原因である可能性がある。この原因についても、LR方向の横圧縮試験を数多く行うことで、詳細に検討していくことが重要である。

(4) 横圧縮ヤング係数と縦圧縮ヤング係数の比

めり込み性能に係わるクロスヘッドの横圧縮ヤング係数と歪ゲージの縦圧縮ヤング係数との比を図 14 に示す。ケヤキ (LTR) においては、横圧縮ヤング係数が縦圧縮ヤング係数の 1/13 となり、ヒノキでは、年輪方向が、LR、LT、LTR となるにつれ 1/13、1/20、1/40 と小さくなった。ケヤキ (LTR) とヒノキ (LTR) で年輪方向が同じであるにもかかわらず、それぞれ 1/13、1/40 と差がでたのは、応力度-歪曲線と同様、樹種、樹齢の違いによるものと考えられる。めり込み解析用の横圧縮ヤング係数については縦圧縮ヤング係数の 1/25 とする規定⁵⁾や、1/50 とする提案⁶⁾もあるが、図 14 をみると、年輪方向や歪計測位置の違いにより大きな差異があることが分かった。今後、めり込み性能を適切に評価し精度よい建物の耐震性能評価を行っていく上で、引き続き検討していく必要がある。

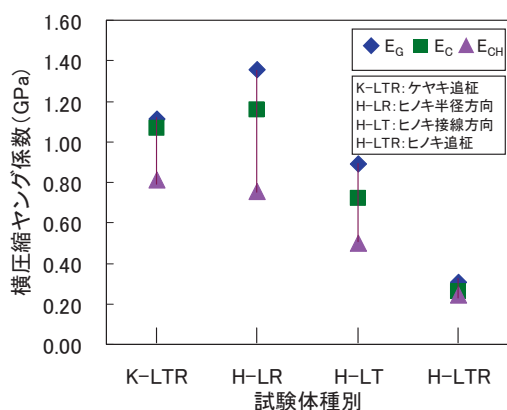


図 12 横圧縮ヤング係数

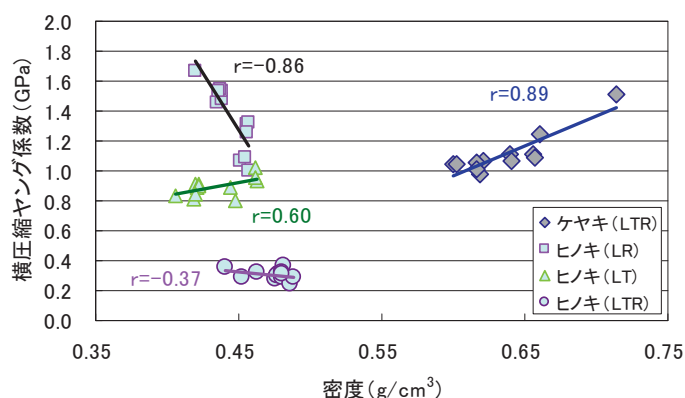


図 13 密度と横圧縮ヤング係数の相関関係

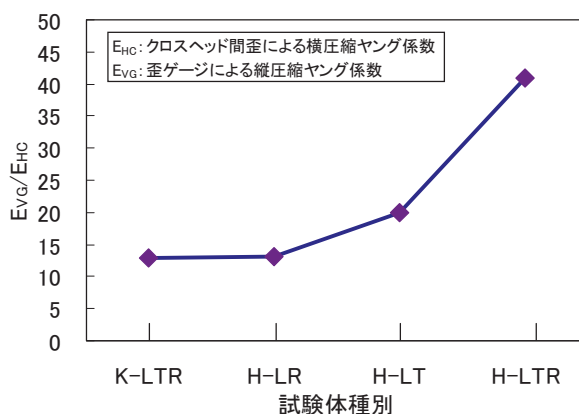


図 14 横圧縮ヤング係数と縦圧縮ヤング係数の比

4. 結論

本研究では、古材の強度特性、圧縮特性の把握を目的に、ケヤキ古材（構造材年数16年）とヒノキ古材（構造材年数375年）を対象とした縦圧縮試験、横圧縮試験を行った。本研究で明らかになったことを以下に示す。

- 1) 縦圧縮試験の結果、ヒノキ古材の歪ゲージ計測による縦圧縮ヤング係数は、2008 年度に行った試験結果に比べ、ヤング係数の平均値は小さくなった。しかしながら、新材を対象とした既往の研究と比較するとヤング係数の平均値は大きい値になった。

- 2) 縦圧縮試験において、ケヤキ古材、ヒノキ古材ともに、歪ゲージ計測のヤング係数と中間部歪のヤング係数はほぼ同じ値となったが、クロスヘッド間歪によるヤング係数はそれらと比べ、40%程度小さい値となった。試験体端部の歪が内部の歪に比べ、試験を開始してから早い時点で増大することが原因だと考えられる。
- 3) 密度と歪ゲージ計測による縦圧縮ヤング係数との相関関係をみると、ヒノキ古材で高い相関関係が得られた。ケヤキ古材においても、外れ値と思われる最大値・最小値を除くと相関関係が高くなった。
- 4) 本試験の歪ゲージ計測におけるヒノキ古材の横圧縮ヤング係数は、新材を対象とした既往の研究に比べ大きくなった。本研究における試験結果からは、構造材として375年経過してもヒノキの縦圧縮および横圧縮の剛性はそれほど経年劣化しなかったと判断される。
- 5) 密度と横圧縮ヤング係数との相関関係をみると、ケヤキ古材、ヒノキ古材ともに高い相関がみられた。密度を把握することで、縦圧縮ヤング係数と同様に、横圧縮ヤング係数の推定もある程度可能だと考えられる。
- 6) 年輪方向、歪計測位置の違いにより、圧縮ヤング係数の値が大きく変化するため、耐震性能評価のために適切なヤング係数を用いる必要がある。

謝辞：本研究を行うにあたり、協力してくださった清水寺に感謝します。また、立命館大学理工学部建築都市デザイン学科の井上真澄助教の協力を得たことに感謝の意を表します。中間部計測装置は京都大学生存圏研究所のもので、使用させていただいたことに感謝します。

参考文献

- 1) 棚橋秀光・村田功二・鈴木祥之：木材の横圧縮特性に関する研究、京都大学生存圏研究所第123回生存圏シンポジウム、2009.3.
- 2) 大岡優・安里祐二・伊津野和行・土岐憲三：伝統木造建築物に用いられた古材の強度劣化および劣化非破壊検査法、歴史都市防災論文集、Vol.2、pp.133-140、2008.10.
- 3) 棚橋秀光・河津知予子・清水秀丸・鈴木祥之：木材の部分圧縮特性に関する研究（その1：ヒノキの均等部分圧縮の場合）、日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）、pp.225-226、2005.9.
- 4) 木材工業ハンドブック：森林総合研究所 改定4版、2004.3.
- 5) 日本建築学会：木質構造設計基準・同解説-許容応力度・許容耐力設計法、2006.12.
- 6) 稲山正弘：木材のめり込み理論とその応用、東京大学学位論文、1991.12.